第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

青海湖流域及周边区域TRMM 3B43降水数据降尺度方法对比分析

李炎坤[1,2]， 高黎明[1,2,3]， 张乐乐[1,2,3]， 吴雪晴[1,2]， 刘轩辰[1,2]， 祁 闻[1,2]

（1. 青海师范大学地理科学学院，青海 西宁 810008；2. 青海师范大学青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室，青海 西宁 810008；3. 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院，青海 西宁 810008）

摘 要： 利用多元线性回归模型（MLR）、主成分逐步回归分析模型（PCSR）、克里金插值法（Kriging），将青海湖流域及周边区域0.25°分辨率的TRMM 3B43降水数据降尺度至0.01°分辨率，并选取研究区范围内20个气象站点的实测降水数据，利用相关系数（CC）、均方根误差（RMSE）和相对偏差（Bias）对降尺度结果进行评价，以此选取更适用于研究区的降尺度方法。结果表明：(1) 基于TRMM及3种降尺度方法获取的研究区降水空间分布具有一致性，年均及春、夏、秋季的降水量均表现为北部高，西部及西北部低，而冬季降水量表现为南部与西北部高，中部低。(2) 研究区降水量随着海拔的增高，以3800 m为界整体上呈现先升高后降低的趋势。(3) 精度评价的结果表明，年尺度上的Kriging精度表现最好；在空间上TRMM及3种降尺度数据在东部地区精度最优。在季尺度上，数据精度表现为PCSR>Kriging>TRMM>MLR；在月尺度上，PCSR数据精度最优。(4) 海拔对研究区内TRMM及3种降尺度数据的影响较小，但随着海拔的升高，遥感数据逐渐出现低估降水的现象，其可能原因在于降水的低估与微波降水率反演时对对流性降水的低估有关。综合降水空间分布一致性分析与精度评价，认为PCSR最适合于青海湖流域及周边区域的TRMM 3B43降水数据降尺度方法。

关键词： TRMM 3B43；降尺度；多元线性回归；主成分逐步回归；克里金插值；青海湖流域

降水是气候系统中的一个重要参数，是水循环的重要组成部分，准确的降水数据对理解区域乃至全球气候变化和水循环过程具有重要意义[1-3]。目前，降水数据的获取方式包括地面气象站观测、降雨雷达和卫星遥感探测[4-6]。在这3种方法中，地面观测获取的降水量最为准确，高密度分布的雨量站理论上可以获取准确的降水空间分布特征，然而在高海拔山区流域，由于观测站点稀少且降水空间差异性大，准确的获取这些区域降水空间分布信息至今是一个挑战[6-7]。降雨雷达通过回波强度对地面进行降水预测，可以减小气象站点以点代面的误差，但其约束条件较多，适用性较差[4-5,8-9]。卫星遥感探测具有覆盖范围广、时空分辨率高和约束条件少的特点，能够弥补地面观测的不足[10-11]。随着遥感技术的发展，不断出现的卫星降水产品在气象水文研究领域得到了广泛应用[7,12-13]，如CMORPH[14]、GPCP[15]、TRMM[16-17]、PERSIANN-CDR[18]以及GPM IMERG[19]等。

然而，现有的遥感降水产品普遍分辨率低，难以满足山区小流域的研究要求，因此对遥感降水产品的降尺度研究逐渐成为热点。Elnashar等[20]利用Google Earth Engine和Google Cloud Computing对TRMM月降水量进行降尺度分析；范雪薇等[21]基于TRMM数据在天山山区构建主成分-逐步回归模型，结果表明降尺度后的数据精度显著优于原始TRMM 3B43数据；张寒博等[22]对GPM IMERG和TRMM 3B43数据进行空间降尺度，以此对华中地区进行降水时空变化分析和干旱监测；李豪等[23]采用

收稿日期： 2022-04-16； **修订日期：** 2022-09-07
基金项目： 国家自然科学基金（42171467，42001060）；青海省基础研究计划（2021-ZJ-947Q）
作者简介： 李炎坤（1997-），女，硕士研究生，研究方向为遥感信息分析及地学应用. E-mail: liyankunkkk@163.com
通讯作者： 张乐乐. E-mail: zhang1986lele@163.com

MGWR与Kriging相结合的方法，建立了MGWRK模型进行降尺度，结果表明降尺度处理不能提高研究区数据精度；徐彬仁等[24]基于随机森林算法对青藏高原TRMM降水数据进行了空间统计降尺度研究；Ghorbanpour等[25]利用5种降尺度方法对乌尔米亚湖流域进行降尺度评估。类似的降尺度研究还有很多，但总体上并没有一个普适的降尺度标准。

青海湖流域位于青藏高原东北部，是重要的生态屏障[26–27]。流域内国家气象局公开数据的气象站点仅有1个，对青海湖流域的水文研究造成很大限制[2,28–29]。张乐乐等[2]在青海湖流域及周边地区通过精度验证评价了TRMM 3B42V7、CMORPH、PERSIANN、PERSIANN-CDR遥感降水资料，结果表明TRMM数据记录的降水量最为准确，精度最好，更适用于青海湖流域及周边地区。然而，TRMM数据由于空间分辨率低（0.25°×0.25°），难以满足小流域尺度水文过程研究需求。因此，有必要通过降尺度获取更高分辨率的降水数据。

因青海湖流域气象站点稀少，本研究将研究范围扩大到包含周围20个气象站点的区域，并以此作为研究区，选用多元线性回归模型（Multivariable Linear Regression，MLR）、主成分–逐步回归模型（Principal Component Stepwise Regression，PCSR）和克里金插值法（Kriging）对TRMM 3B43数据进行降尺度，并利用研究区内20个气象站点的实测数据，从年、季、月尺度对降尺度结果进行精度评价。本研究的主要目的是选出最合适的青海湖流域TRMM 3B43数据降尺度方法，为流域开展高分辨率生态、水文过程模拟提供数据支撑。

1　研究区与数据方法

1.1　研究区概况

青海湖流域位于36°15′~38°20′N，97°50′~101°20′E之间，流域面积约29661 km²，湖泊面积约为4400 km²。青海湖流域南至青海南山，西至阿木尼尼库山，东至日月山，北至大通山，形成一个完整的封闭型高原内陆盆地。整个流域呈西北–东南走向，地势西北高东南低[30–32]。因青海湖流域气象站点稀少，研究区划定范围扩大到包含周围20个气象站点的区域，经纬度范围为35°~39°N，97°~103°E（图1）。研究区地形以高原为主，地势整体西高东低，海拔1330~5663 m，西北和西南整体海拔均在4000 m以上。研究区降水量特征表现为季节分布不均，夏季降水量占主导地位且较为集中，其次是春秋季，冬季最少[33–34]。

1.2　数据来源与预处理

TRMM 3B43降水数据来源于NASA网站（https:

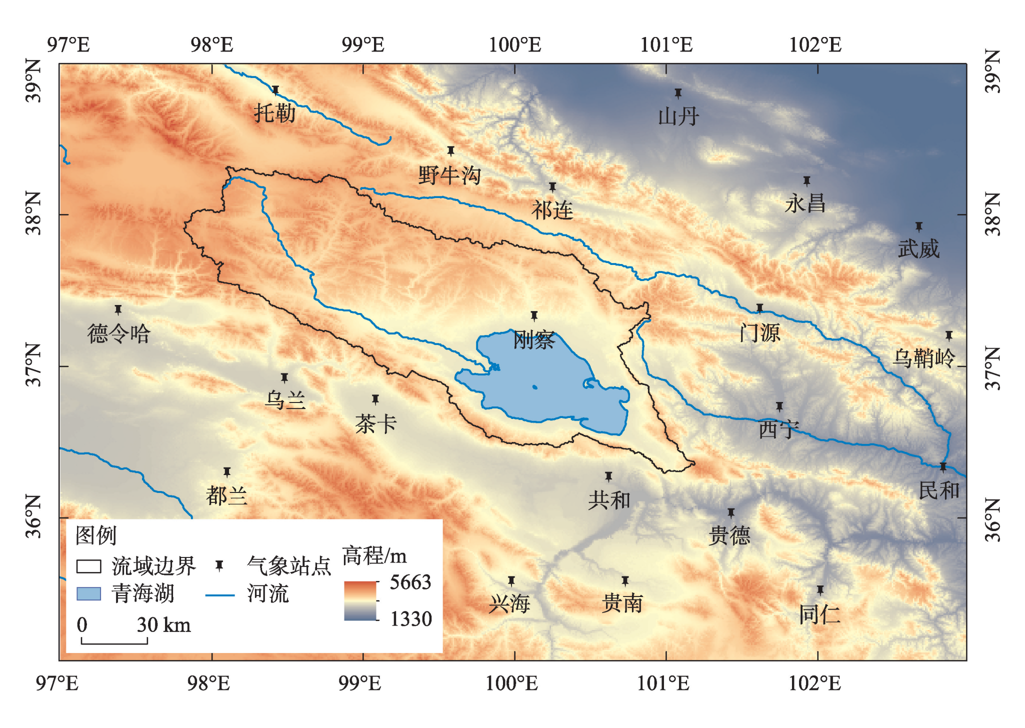


图1　研究区位置及气象站点分布

Fig. 1　Location of the study area and distribution of meteorological sites

//search.earthdata.nasa.gov），空间分辨率为0.25°×0.25°，时间分辨率为月尺度，覆盖范围在全球南北纬50°之间，时间为1979年至今，本研究选取的数据年份为2010—2019年。TRMM数据为NetCDF格式，处理时首先要借助ArcGIS进行格式、投影转换。TRMM 3B43原始降水数据的单位为mm·h^{-1}，乘以每个月的小时数即可得到月降水量。

DEM数据采用SRTMDEM 90 m分辨率原始高程数据，数据来源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/search）。坡度和坡向数据由DEM数据生成。并通过裁剪、重采样获得研究区0.25°和0.01°分辨率的高程数据，并基于ArcGIS水文分析工具得到了研究区0.25°和0.01°分辨率的坡度和坡向数据。

NDVI数据采用MODIS数据MOD13A3产品，数据来源于NASA网站（https://search.earthdata.nasa.gov），空间分辨率为1 km，时间分辨率为月尺度，数据下载年份为2010—2019年。处理时首先运用ENVI进行图像拼接、异常值处理、格式转换，再在ArcGIS中进行投影转换和研究区裁剪。

气象站点观测降水数据采用中国气象数据网（http://data.cma.cn），在本研究区内共有20个气象观测站点，分别为托勒、野牛沟、祁连、德令哈、刚察、门源、乌兰、都兰、共和、西宁、贵德、民和、兴海、贵南、同仁、茶卡、乌鞘岭、武威、永昌、山丹（图1）。本研究选取的降水观测数据时间尺度与TRMM数据一致，观测数据的时间分辨率为日，通过叠加可以获取月、季节和年尺度的降水数据，研究期内数据无缺测。

1.3 研究方法

降尺度方法选用多元线性回归模型（MLR）、主成分-逐步回归模型（PCSR）和普通克里金插值法（Kriging）。其中Kriging方法可以在ArcGIS软件中直接实现。MLR通过2个或2个以上的影响因素作为自变量来解释因变量的变化，以此建立影响因子与自变量的回归模型。降水的形成受到多种因素的影响[35]，本文选取经度、纬度、高程、坡度、坡向和归一化植被指数（NDVI）作为影响因子，建立与TRMM降水数据的回归模型，一般方程如下：

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + k \quad (1)$$

式中：y为TRMM降水数据；a_0~a_6表示回归系数；x_1~x_6表示回归因子；k表示降水残差值。

PCSR方法可以将多个影响因子转化成几个独立因子进行分析。在保证信息最大化的前提下对原来的影响因子进行处理，并在处理过程中剔除不显著的解释变量，以此来提高研究效率并使信息更为精确[21]。本文通过构建PCSR模型建立TRMM数据与影响因子的方程，进行降尺度空间转换，模型构建如下：

$$Y = \left(b + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \cdots\right) + K \quad (2)$$

式中：Y为TRMM降水量降尺度后的数据；b~b_3表示主成分回归系数；X_1~X_3表示主成分回归因子；（b+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+…）表示由PCSR回归得到的降水回归值；K表示降水残差值。

具体步骤如下：将DEM数据、经纬度、NDVI处理到相同0.25°分辨率下，运用Matlab软件将各数据所有栅格中心像元点的数值进行汇总；通过Matlab、SPSS计算得到回归系数，汇总得到0.25°分辨率降水预测回归值和降水残差；采用普通克里金法对降水残差进行插值，得到0.01°分辨率残差数据；将0.25°分辨率下得到的回归系数代入到0.01°分辨率下的回归因子中，并加上高分辨率残差数据，最终得到0.01°分辨率下TRMM降水量降尺度数据，实现降尺度的转换。

1.4 精度评价

选择2010—2019年年均、季均和月份的降尺度数据，通过ArcGIS提取研究区范围内20个气象站点的值，与降水实测值进行精度评价，采用相关系数（CC）、均方根误差（RMSE）和相对偏差（Bias）评价降尺度结果[5,29]。其中CC的取值范围为[-1,1]，CC值越接近1，说明格点数据与观测降水数据的一致性越高。RMSE的取值范围为[0, +∞)，值越接近0，表示格点降水数据越准确。Bias的取值范围为[-1,1]值，取值越接近0，表示格点降水数据与观测降水数据偏离程度越小。

2 结果与分析

2.1 青海湖流域降水空间分布特征

利用MLR、PCSR和Kriging方法对TRMM数据降尺度，并通过不同时间尺度处理，得到青海湖流域2010—2019年年平均和春、夏、秋、冬4个季节平均降水量的空间分布（图2）。图2a~图2d给出了TRMM原始数据以及3种降尺度方法得到的青海湖

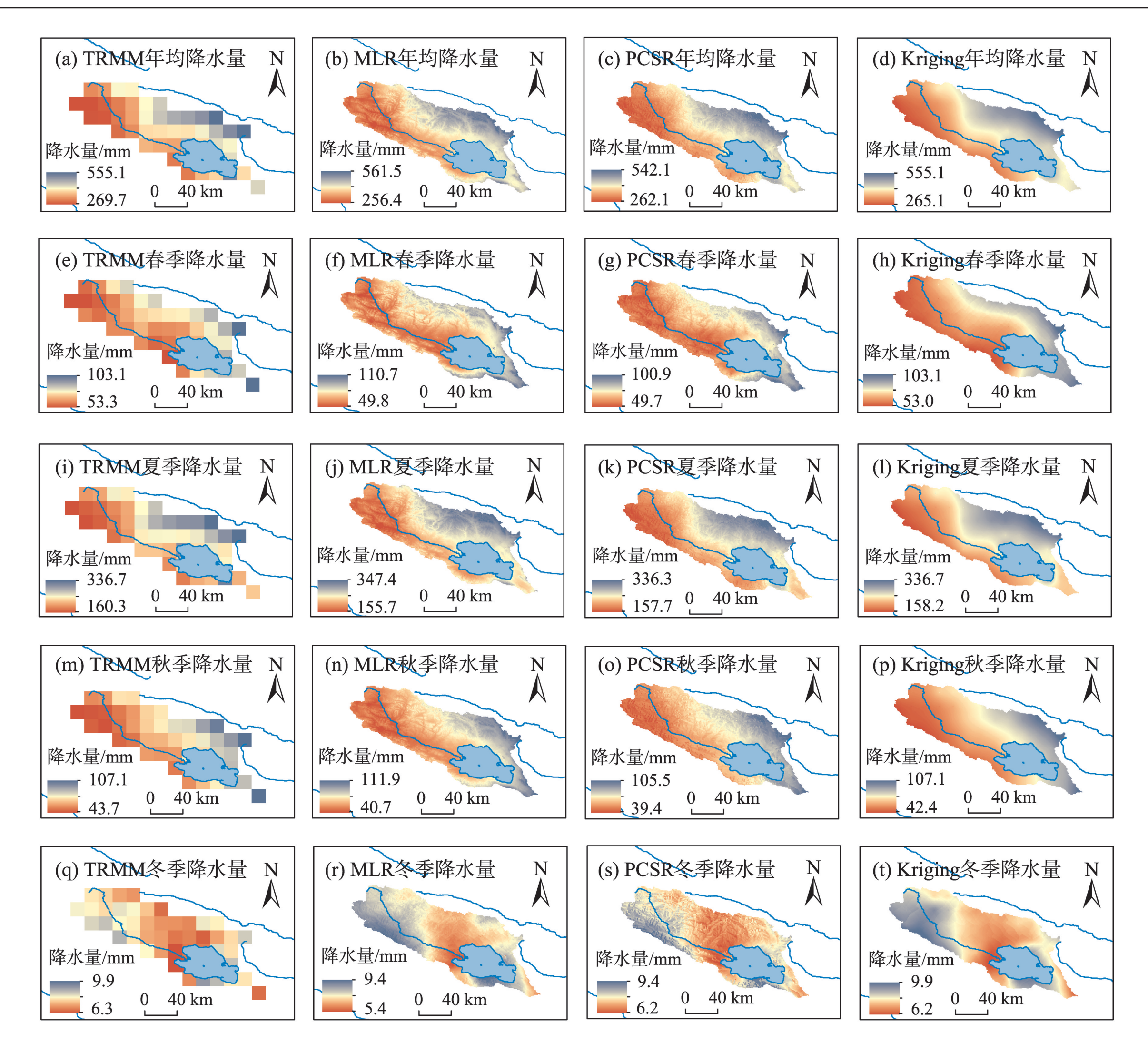


图2　青海湖流域降尺度结果空间分布

Fig. 2　Spatial distribution map of downscaling results in Qinghai Lake Basin

流域范围内年平均降水量空间分布。从结果来看,经过降尺度之后得到的年平均降水量与原始TRMM数据的空间分布一致,降水量高值区主要分布于青海湖北部,低值区主要集中在青海湖西部及西北部。从降水量的取值范围来看,Kriging降尺度降水量最大值与TRMM数据保持一致,MLR降尺度降水量最大值略高于TRMM数据,而PCSR降尺度降水量最大值略低于TRMM数据,此外,3种降尺度数据的降水量最小值均低于TRMM数据。

由图2e~图2t可知,经过降尺度之后得到的季均降水量与TRMM数据的空间分布一致。其中,春、夏、秋季空间分布与年均降水空间分布类似,而冬季降水量高值区分布在青海湖南部与西北部,低值区分布在青海湖流域中部。

为了进一步给出青海湖流域及周边区域不同海拔降水量的差异,按照500 m间隔在研究区划分出了9个海拔梯度,并统计了每个海拔梯度的年平均降水量(图3)。其中,5300~5663 m海拔范围内空间较少,因此将最后2类合并为4800~5663 m一级。结果表明,随着海拔的增高,研究区年平均降水量整体上呈现先升高后降低的趋势。在1330~2800 m,降水量随着海拔的升高不断增加,在2800~3300 m,降水量随着海拔的升高有小幅下降,在3300~3800 m海拔范围内,降水量随海拔的升高而增加并达最大值,当海拔在3800~4800 m,降水量随海拔的增加不断降低,在海拔高于4800 m后,除MLR降水量随着海拔上升而小幅增加外,其余降水量均呈下降趋势。

2.2　降尺度模型评价与对比

为了对降尺度模型进行精度验证,本文主要利

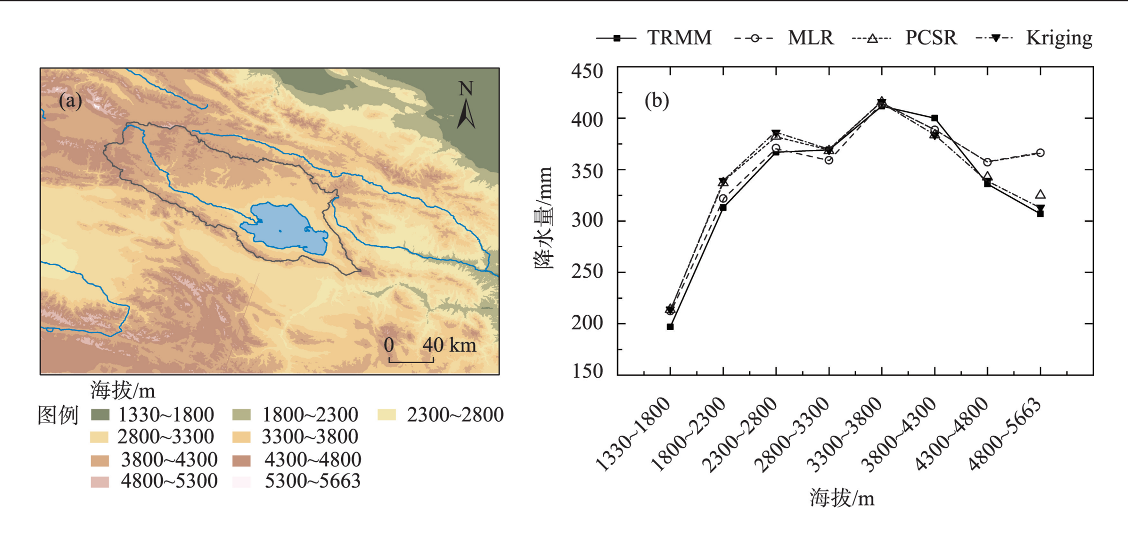


图3 研究区海拔划分(a)及降水量随海拔的变化(b)

Fig. 3 The elevation division of the study area (a) and the change of precipitation with elevation (b)

用研究区域内20个气象站点的年均、季均、月降水量进行对比验证分析。运用ArcGIS中的提取分析工具,提取各站点降尺度后的年、季、月数据,并计算CC、RMSE、Bias 3种评价指标。

2.2.1 年降水量评价 从图4中可以看出,TRMM原始数据与观测数据的CC和RMSE值为0.83和69.59;MLR、PCSR和Kriging降尺度数据与观测数据的CC值分别为0.86、0.85和0.85,RMSE值分别为73.39、65.61和65.19。从这个结果来看,3种降尺度数据得到的降水量与观测数据的一致性均优于原始TRMM数据,其中MLR数据的CC值最优。PCSR与Kriging数据的RMSE值优于TRMM,但MLR数据差于TRMM数据。此外,Kriging数据的Bias值优于TRMM原始数据,PCSR数据没有变化,而MLR则差于TRMM原始数据。综合来看,在年尺度上基于Kriging方法得到的降水数据精度最优,其次为PCSR数据,MLR数据精度最差。

为了讨论TRMM及其降尺度结果空间分布与气象站实际降水空间分布的一致性,以气象站点年均降水量为参考,计算了各站点的CC、RMSE和Bias,并以100.7°E将其划分为西部地区和东部地区,以此得到年尺度上东、西部地区的精度评价箱线图对比(图5和图6)。在空间上,TRMM及3种降尺度数据均显示东部地区的CC值较高,RMSE值较小,表明该地区格点数据与实测降水更一致,数据的误差在此区域更小;图5中的Bias显示在研究区西侧的各数据均低估了降水,研究区东侧格点数据高估了大多数站点的降水。由图6结果表明,TRMM及3种降尺度数据的CC值在东部地区均高于西部地区,RMSE和|Bias|值在东部地区低于西部地区。综上所述,TRMM及3种降尺度数据在东部地区精度最优。

2.2.2 季降水量评价 由图7可知,在数据精度方面,Kriging数据在春季的CC、RMSE表现最好;从夏季来看,MLR数据的CC值表现最好,但RMSE及Bias均最差,PCSR与Kriging数据在RMSE与Bias值表

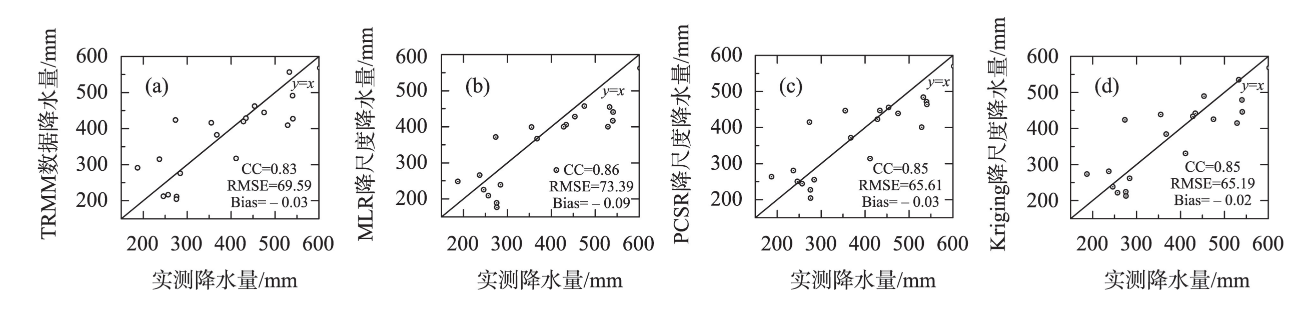


图4 实测降水量与TRMM数据及其降尺度数据年均散点图

Fig. 4 Annual average scatter plot of measured precipitation and TRMM data and its downscaled data

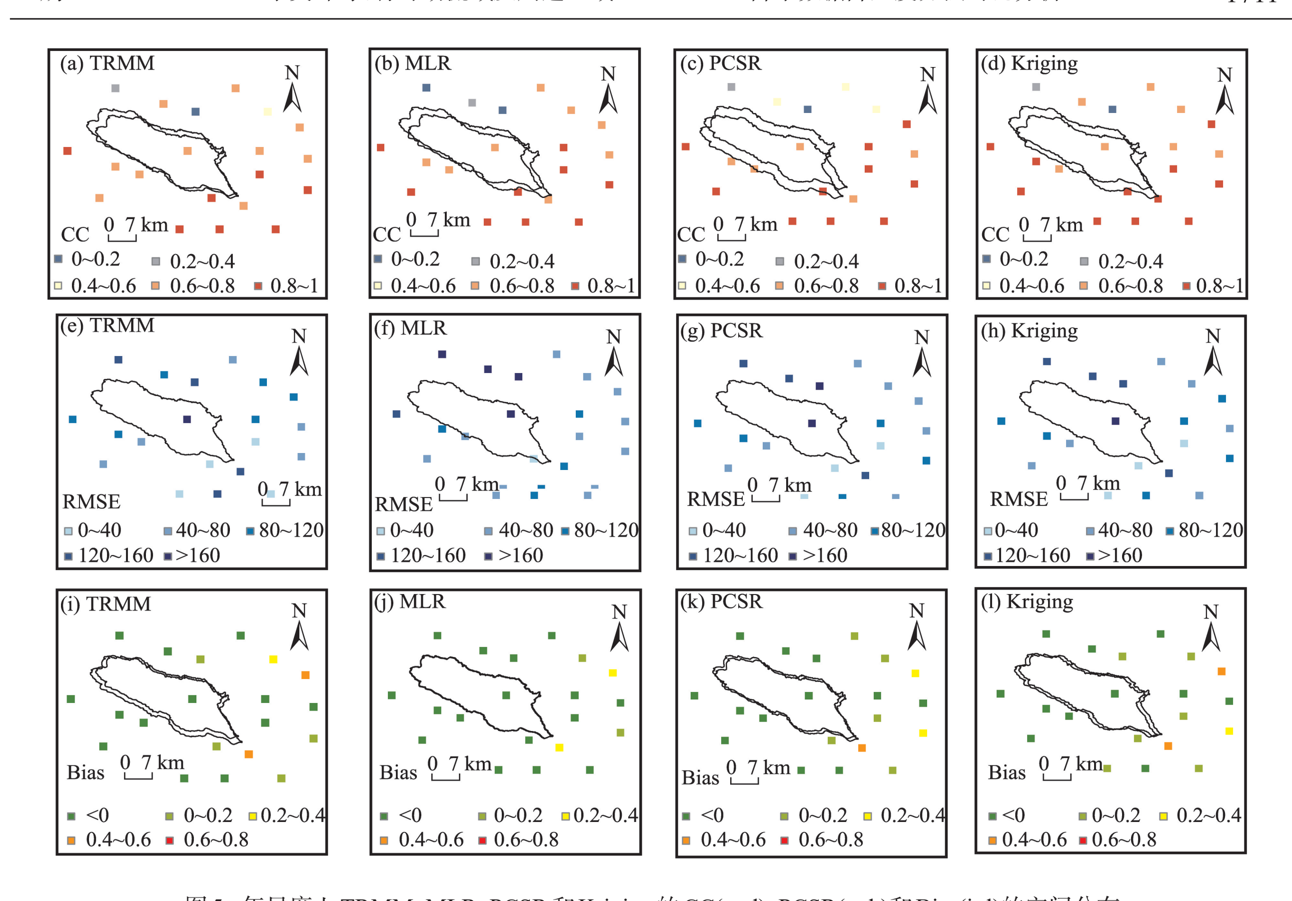


图5　年尺度上TRMM、MLR、PCSR和Kriging的CC(a~d)、PCSR(e~h)和Bias(i~l)的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of CC (a-d), PCSR (e-h) and Bias (i-l) of TRMM, MLR, PCSR and Kriging on yearly scale

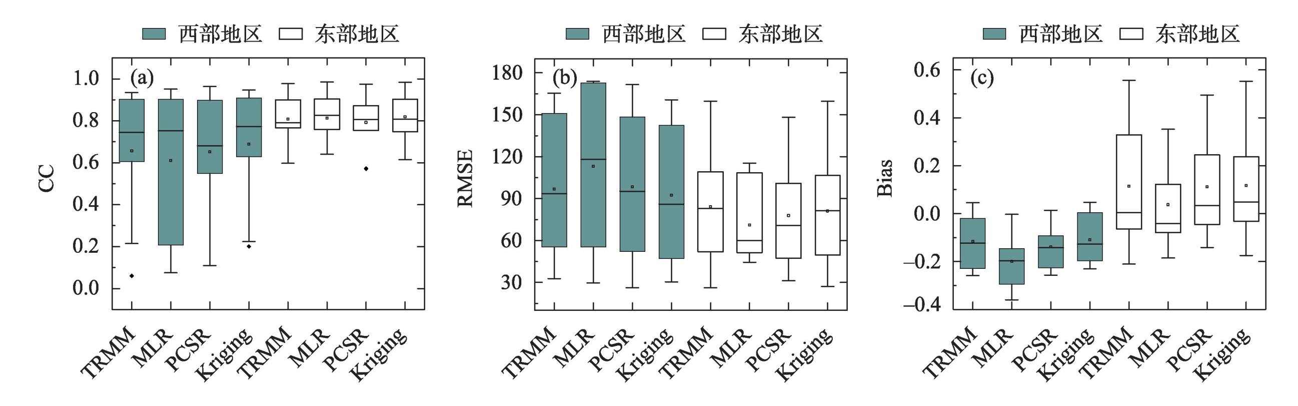


图6　年尺度上TRMM及3种降尺度数据在东西部地区的精度评价箱线图对比

Fig. 6　Comparison of boxplots for accuracy evaluation of TRMM and three types of downscaled data in the eastern and western regions on the annual scale

现均较好;秋季的RMSE和Bias值中PCSR数据表现最好,但其CC值较差于Kriging数据;TRMM数据在冬季的CC、RMSE和Bias表现最好,Kriging数据表现最差。此外,冬季的|Bias|值均为正值且较大,反映出4种数据在冬季偏离程度均较大,且均大于实测降水量。以往研究表明,在站点尺度上,普遍认为雨量筒获取的降水量最为准确[36],然而雨量筒获取的降雨量受很多因素的影响,如自身误差、安装位置、蒸散发和降水类型等[37-38]。其中,降水类型按照气温划分,主要可分为液态降水、混合降水和固态降水,在寒冷的青海湖及周边地区固态降水占有很大比重,而雨量筒对固态降水的捕捉率最差[39],造成该地区冬季的实测降水量低于实际降水量。因此,在冬季固态降水观测误差本身比较大,可能是冬季TRMM数据及3种降尺度数据的Bias值为正值且比较大的原因。综合来看,春季的Kriging数据

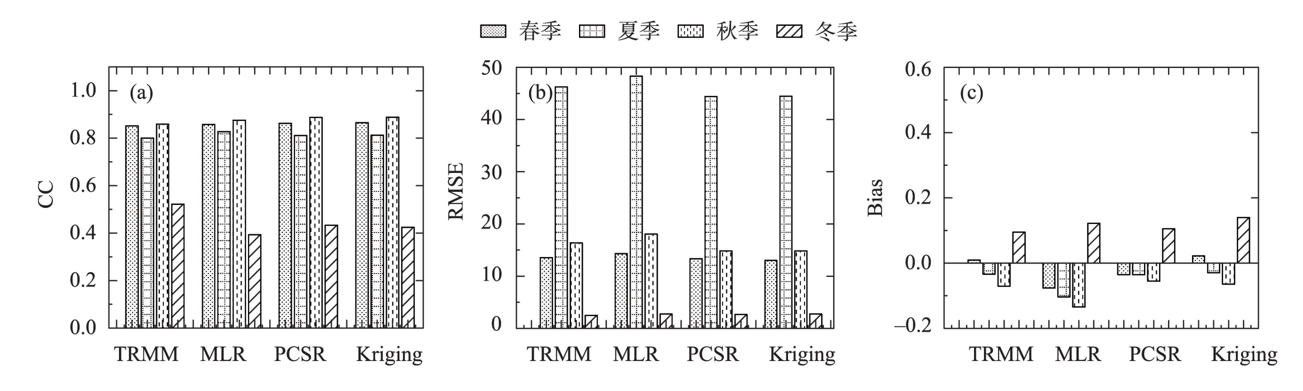


图7 TRMM数据及降尺度季均数据精度对比

Fig. 7 Accuracy comparison between TRMM data and downscaled quarterly average data

精度最优，在夏季PCSR与Kriging数据精度基本持平，在秋季PCSR数据最好，而冬季的TRMM数据表现最佳。

2.2.3 月降水量评价 运用提取分析工具提取了2010—2019年各个站点12个月的TRMM数据、MLR、PCSR及Kriging降尺度数据。将2010—2019年的月气象站点数据降水量作为自变量，TRMM数据与3种降尺度降水数据作为因变量，得到散点图(图8)。从图8可以看出，TRMM数据与实测数据相关系数CC为0.89，均方根误差RMSE为17.51，相对误差Bias为−0.03；MLR降尺度数据与实测数据CC为0.90，RMSE为17.36，Bias为−0.10；PCSR降尺度数据与实测数据CC为0.89，RMSE为17.21，Bias为−0.03；Kriging降尺度数据与实测数据CC为0.72，RMSE为27.75，Bias为−0.02。从相关系数CC来看，MLR降尺度数据同实测降水数据相关性最好，其次

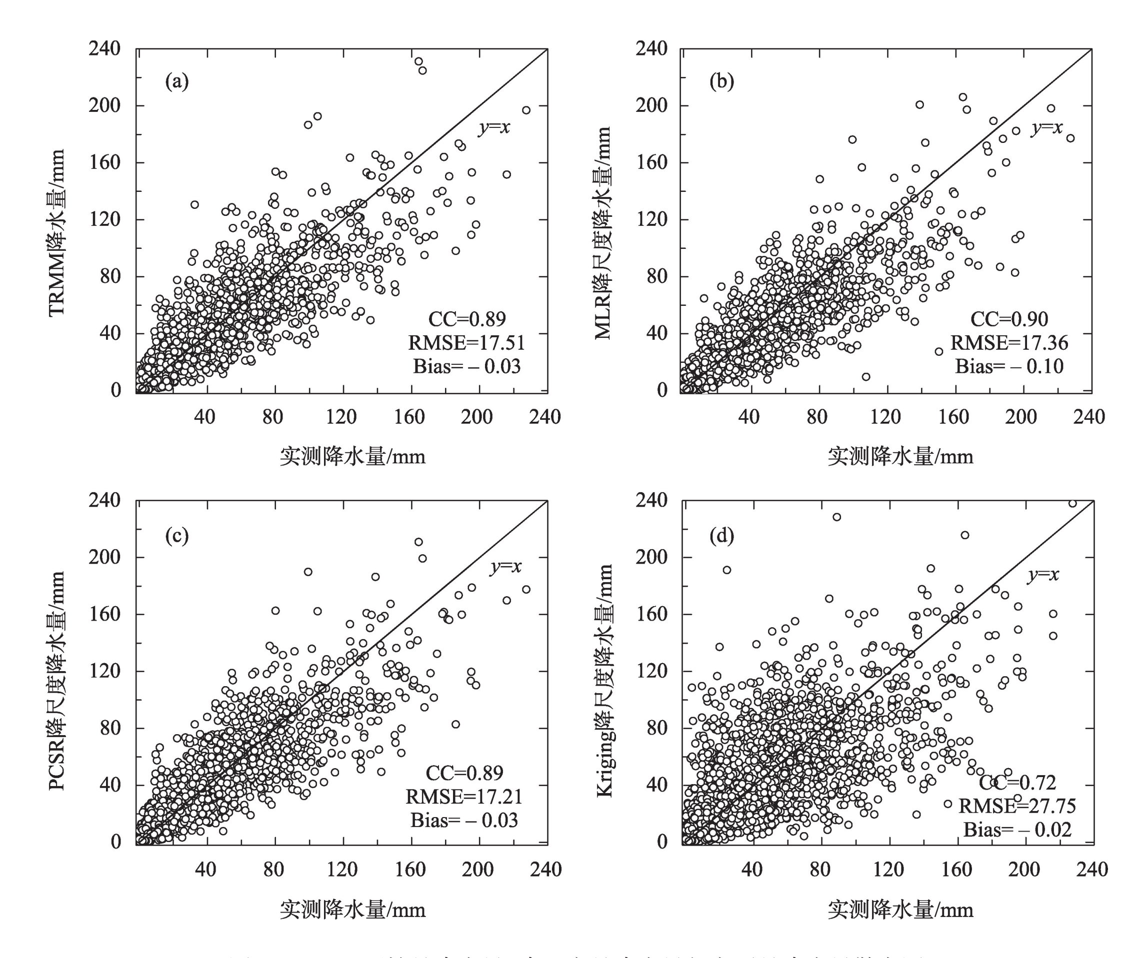


图8 TRMM原始月降水量、降尺度月降水量与实测月降水量散点图

Fig. 8 Scatter plot of TRMM original monthly precipitation, downscaled monthly precipitation and measured monthly precipitation

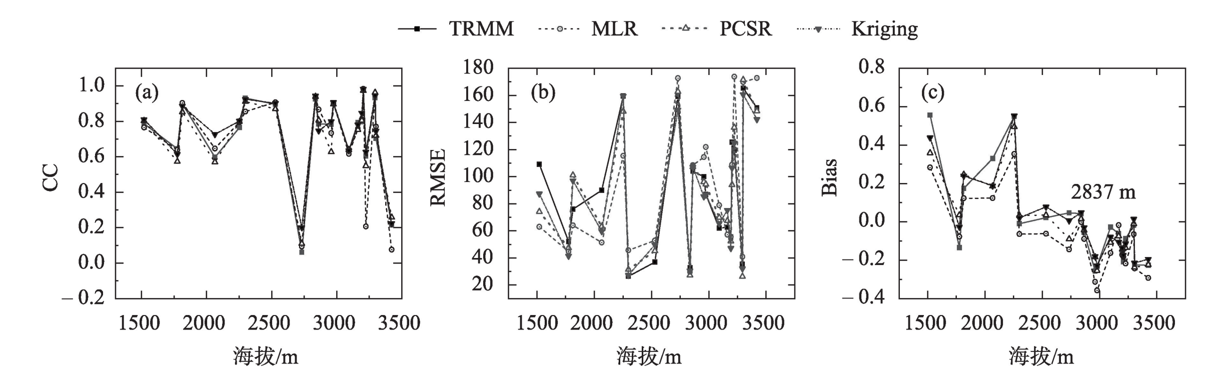


图9　各站点海拔与格点数据精度评价指标统计

Fig. 9　Statistics of the accuracy evaluation indicators of the altitude and grid data of each station

为PCSR与TRMM数据，Kriging数据同实测降水数据相关性最差。从均方根误差RMSE来看，TRMM数据和3种降尺度结果与实测降水值的接近程度表现为PCSR>MLR>TRMM>Kriging。从相对误差Bias来看，|Bias|表现为Kriging<PCSR=TRMM<MLR。此外，通过各散点数据与$y=x$线进行对比，发现可以看出，PCSR与MLR数据集中程度相近，其次为TRMM数据，Kriging数据离散程度最高，精度最差。综合来看，在月尺度上PCSR数据精度较好，Kriging数据精度最差。

2.3　海拔对TRMM及其降尺度数据的影响分析

以往研究表明，海拔是影响山地降水的重要因素，随着海拔的升高，降水量一般呈上升的趋势，但遥感数据往往无法准确表达降水的变化[40]。为此将各站点海拔按照由低到高的顺序与其对应的格点数据精度评价指标进行统计(图9)。结果表明，CC值与RMSE值随着海拔的升高没有明显的变化趋势，且波动较大，说明海拔对研究区内TRMM及其降尺度数据的影响不大；随着海拔的升高，Bias值由正转负，整体呈下降趋势，表明TRMM数据随着海拔的升高逐渐出现低估降水的现象，这与卢新玉等[35]、李琼等[41]研究结果是一致的。综上所述，在1330~3800 m海拔范围内，研究区降水量随着海拔的升高而逐渐增加，因此在降水量较多的山区对流性降水占总降水比率较高，而TRMM数据微波降水率反演时对对流性降水有一定程度低估[42-43]，导致降水量较高的山区出现低估降水的现象。

3　结 论

本文以青海湖流域及周边区域作为研究区域，选取经纬度、坡度、坡向、DEM、NDVI作为影响因子，对2010—2019年间的TRMM数据进行降尺度处理，通过构建多元线性回归模型(MLR)、主成分-逐步回归模型(PCSR)和普通克里金插值法(Kriging)进行降尺度研究，并运用CC、RMSE、Bias作为评价指标进行精度验证和对比分析，得到以下结论：

(1) TRMM及3种降尺度数据与气象站点数据在青海湖流域及周边区域得到降水空间分布具有一致性。年均及春、夏、秋季的降水量均表现为北部高，西部及西北部低，而冬季降水量表现为南部与西北部高，中部低。此外，研究区降水量随着海拔的增高，以3800 m为界整体上呈现先升高后降低的趋势。

(2) 在精度评价方面，PCSR降尺度数据在青海湖流域及周边区域表现更为准确。从年尺度上来看，Kriging精度表现最好，在空间上TRMM及3种降尺度数据在东部地区精度最优；在季尺度上，数据精度表现为PCSR>Kriging>TRMM>MLR；在月尺度上，PCSR数据精度最好。

(3) 研究区内TRMM及3种降尺度数据受海拔影响较小，但随着海拔的升高，TRMM及其降尺度数据逐渐出现低估降水的现象，其可能原因在于降水的低估与微波降水率反演时对对流性降水的低估有关。

参考文献(References)：

[1]　沈思民, 赵军, 刘佳茹, 等. 祁连山TRMM降水数据降尺度不同方法比较研究[J]. 山地学报, 2019, 37(6): 923−931. [Shen Simin, Zhao Jun, Liu Jiaru, et al. Comparative study on different downscaling methods of TRMM satellite precipitation data over the Qilian Mountains, China[J]. Mountain Research, 2019, 37(6): 923−

931.]

[2] 张乐乐, 高黎明, 陈克龙. 高分辨率遥感降水资料在青海湖流域及周边区域的适用性评价[J]. 水文, 2020, 40(5): 15−21. [Zhang Lele, Gao Liming, Chen Kelong. Applicability evaluation of high-resolution remote sensing precipitation data in Qinghai Lake basin and surrounding areas[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(5): 15−21.]

[3] Ma Y, Tang G, Long D, et al. Similarity and error intercomparison of the GPM and its predecessor-TRMM multisatellite precipitation analysis using the best available hourly gauge network over the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 2016, 8(7): 569.]

[4] 袁飞, 赵晶晶, 任立良, 等. TRMM多卫星测雨数据在赣江上游径流模拟中的应用[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2013, 46(7): 611−616. [Yuan Fei, Zhao Jingjing, Ren Liliang, et al. Application of TRMM multi-satellite rainfall data in runoff simulation of the upper reaches of Ganjiang River[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2013, 46(7): 611−616.]

[5] 窦世卿, 张寒博, 徐勇, 等. TRMM降水数据在长江流域的降尺度分析与校正[J]. 中国农业气象, 2021, 42(5): 377−389. [Dou Shiqing, Zhang Hanbo, Xu Yong, et al. Downscaling analysis and correction of TRMM precipitation data in the Yangtze River Basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(5): 377−389.]

[6] 宋海清, 朱仲元, 李云鹏. 陆面同化及再分析降水资料在内蒙古地区的适用性[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1624−1636. [Song Haiqing, Zhu Zhongyuan, Li Yunpeng. Validation of land data assimilation and reanalysis precipitation datasets over Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1624−1636.]

[7] 杜军凯, 贾仰文, 李晓星, 等. 基于TRMM卫星降水的太行山区降水时空分布格局[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 1−13. [Du Junkai, Jia Yangwen, Li Xiaoxing, et al. Study on the spatial-temporal distribution pattern of precipitation in the Taihang Mountain region using TRMM data[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 1−13]

[8] 温婷婷, 郭英香, 董少睿, 等. 1979—2017年CRU, ERA5, CMFD格点降水数据在青藏高原适用性评估[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 684−697. [Wen Tingting, Guo Yingxiang, Dong Shaorui, et al. Assessment of CRU, ERA5, CMFD grid precipitation data for the Tibetan Plateau from 1979 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 684−697.]

[9] 谷黄河, 余钟波, 杨传国, 等. 卫星雷达测雨在长江流域的精度分析[J]. 水电能源科学, 2010, 20(8): 3−6. [Gu Huanghe, Yu Zhongbo, Yang Chuanguo, et al. Accuracy analysis of satellite radar rain measurement in the Yangtze basin[J]. Water Resource And Power, 2010, 20(8): 3−6.]

[10] 崔路明, 王思梦, 刘轶欣, 等. TRMM和GPM卫星降水数据在中国三大流域的降尺度对比研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(6): 1317−1328. [Cui Luming, Wang Simeng, Liu Yixin, et al. Comparative study on downscaling of TRMM and GPM satellite precipitation data in three major river basins in China[J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2021, 30(6): 1317−1328.]

[11] 孙铭悦, 吕海深, 朱永华, 等. 2套气象数据在资料缺乏地区的适用性评估——以呼图壁河流域为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 94−103. [Sun Mingyue, Lv Haishen, Zhu Yonghua, et al. Applicability assessment of two meteorological datasets in areas lacking data with the Hutubi River Basin as an example[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 94−103.]

[12] 盛夏, 石玉立, 丁海勇. 青藏高原GPM降水数据空间降尺度研究[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(3): 571−580. [Sheng Xia, Shi Yuli, Ding Haiyong. Spatial Downscaling of GPM Precipitation over the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(3): 571−580.]

[13] 宁珊, 张正勇, 刘琳, 等. TRMM偏最小二乘降尺度降水模型在新疆不同地貌的适应性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 99−109. [Ning Shan, Zhang Zhengyong, Liu Lin, et al. Adaptability of precipitation estimation method based on TRMM data combined with partial least squares downscaling in different landforms of Xinjiang, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 99−109.]

[14] Zhang T, Yang Y, Dong Z, et al. A multiscale assessment of three satellite precipitation products (TRMM, CMORPH, and PERSIANN) in the Three Gorges Reservoir Area in China[J]. Advances in Meteorology, 2021, 9979216: 1−27.

[15] Adler R F, Sapiano M R P, Huffman G J, et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis (new version 2.3) and a review of 2017 global precipitation[J]. Atmosphere, 2018, 9(4): 138.

[16] 李麒崙, 张万昌, 易路, 等. GPM与TRMM降水数据在中国大陆的精度评估与对比[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 303−313. [Li Qilun, Zhang Wanchang, Yi Lu, et al. Accuracy evaluation and comparison of GPM and TRMM precipitation product over Mainland China[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 303−313.]

[17] Dhib S, Chaney N, Mannaerts C M, et al. Comparison of two bias correction methods for TRMM 3B42 satellite daily rainfall estimates over Northern Tunisia[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(7): 1−18.

[18] 刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 不同降水卫星数据反演降水量精度评价——以雅鲁藏布江流域为例[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 386−396. [Liu Jiangtao, Xu Zongxue, Zhao Huan, et al. Accuracy assessment for two satellite precipitation products: Case studies in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(2): 386−396.]

[19] Prakash S, Mitra A K, AghaKouchak A, et al. A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region[J]. Journal of Hydrology, 2018, 556: 865−876.

[20] Elnashar A, Zeng H, Wu B, et al. Downscaling TRMM monthly precipitation using google earth engine and google cloud computing[J]. Remote Sensing, 2020, 12(23): 3860.

[21] 范雪薇, 刘海隆. 天山山区 TRMM 降水数据的空间降尺度研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 478-488. [Fan Xuewei, Liu Hailong. Downscaling method of TRMM satellite precipitation data over the Tianshan Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 478-488.]

[22] 张寒博, 窦世卿, 温颖, 等. 遥感降水数据空间降尺度及干旱时空监测[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 153-160. [Zhang Hanbo, Dou Shiqing, Wen Ying, et al. Spatial downscaling of remote sensing precipitation data and spatiotemporal monitoring of drought[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 153-160.]

[23] 李豪, 雷苑, 李鹏, 等. 复杂地形下 TRMM 降水数据的降尺度研究: 以四川省为例[J]. 中国农业气象, 2019, 40(10): 607-619. [Li Hao, Lei Yuan, Li Peng, et al. Downscaling of TRMM precipitation data under complex terrain: A case study of Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(10): 607-619.]

[24] 徐彬仁, 魏瑗瑗. 基于随机森林算法对青藏高原 TRMM 降水数据进行空间统计降尺度研究[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(3): 181-188. [Xu Binren, Wei Yuanyuan. Spatial statistics of TRMM precipitation in the Tibetan Plateau using random forest algorithm [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2018, 30(3): 181-188.]

[25] Ghorbanpour A K, Hessels T, Moghim S, et al. Comparison and assessment of spatial downscaling methods for enhancing the accuracy of satellite-based precipitation over Lake Urmia Basin[J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: 126055.

[26] 高黎明, 张乐乐, 陈克龙, 等. 青海湖流域高寒湿地光合有效辐射特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 50-56. [Gao Liming, Zhang Lele, Chen Kelong, et al. Characteristics of the photosynthetically active radiation in the alpine wetland, Qinghai lake watershed[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 50-56.]

[27] 刘彩红, 王朋岭, 温婷婷, 等. 1960—2019 年黄河源区气候变化时空规律研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 293-302. [Liu Caihong, Wang Pengling, Wen Tingting, et al. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Yellow River source area from 1960 to 2019[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 293-302.]

[28] 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 等. 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 826-836. [Yu Xiaoqin, Meng Xianqiang, Wu Huawu, et al. Source and characteristics analysis of colored soluble organic matter in Qinghai Lake Basin [J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 826-836.]

[29] 高晨轩. 利用多源卫星测高数据监测青海湖水位变化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021. [Gao Chenxuan. Using Multi-source Satellite Altimeter Data to Monitor the Water Level Change of Qinghai Lake[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.]

[30] Tang L, Duan X, Kong F, et al. Influences of climate change on area variation of Qinghai Lake on Qinghai-Tibetan Plateau since 1980s[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-7.

[31] 张晶, 鄂崇毅, 许乃军, 等. 青海湖流域气候变化对湖泊水位变化的影响[J]. 青海环境, 2021, 31(2): 71-75, 81. [Zhang Jing, E Chongyi, Xu Naijun, et al. Impact of climate change in Qinghai Lake Basin on lake water level change[J]. Journal of Qinghai Environment, 2021, 31(2): 71-75, 81.]

[32] 王志刚, 曹生奎, 曹广超. 近15年来青海湖流域气温、降水变化对植被物候驱动分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 249-255. [Wang Zhigang, Cao Shengkui, Cao Guangchao. Analysis on the drive of temperature and precipitation changes to vegetation phenology of the Qinghai Lake Basin in the past 15 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 249-255.]

[33] 姬凯, 王士新, 左洪超, 等. 东亚副热带急流经向位置对中国西北东部盛夏降水的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 10-17. [Ji Kai, Wang Shixin, Zuo Hongchao, et al. Effect of meridional position of East Asian subtropical jet on midsummer precipitation in eastern part of Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2020, 37 (1): 10-17.]

[34] 杨昭明, 张调风. 1961—2017 年青藏高原东北部雨季降水量变化及其贡献度分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 22-28. [Yang Zhaoming, Zhang Tiaofeng. Analysis of precipitation change and its contribution in the rainy season in the northeast Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 22-28.]

[35] 卢新玉, 魏鸣, 王秀琴, 等. TRMM-3B43降水产品在新疆地区的适用性研究[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 166-173. [Lu Xinyu, Wei Ming, Wang Xiuqin, et al. Applicability research on TRMM-3B43 precipitation over Xinjiang[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2016, 28(3): 166-173.]

[36] Xu R, Tian F, Yang L, et al. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(2): 910-924.

[37] 张乐乐, 高黎明, 赵林, 等. 降水观测误差修正研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(7): 723-730. [Zhang Lele, Gao Liming, Zhao Lin, et al. Review on correction of errors in precipitation measurement[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(7): 723-730.]

[38] Shi Y, Song L. Spatial downscaling of monthly TRMM precipitation based on EVI and other geospatial variables over the Tibetan Plateau from 2001 to 2012[J]. Mountain Research and Development, 2015, 35(2): 180-194.

[39] 何晓波, 叶柏生, 丁永建. 青藏高原唐古拉山区降水观测误差修正分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 403-408. [He Xiaobo, Ye Baisheng, Ding Yongjian. Bias correction for precipitation mesuament in Tanggula Mountain Tibetan Plateau[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 403-408.]

[40] 吴建峰, 陈阿林, 嵇涛, 等. TRMM 降水数据在复杂山地的精度评估——以重庆市为例[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 201-207. [Wu Jianfeng, Chen Alin, Ji Tao, et al. Accuracy evaluation

of tropical rainfall measuring mission [recipitation data in complex mountainous areas: Taking Chongqing City as an example[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4): 201-207.]

[41] 李琼, 杨梅学, 万国宁, 等. TRMM 3B43降水数据在黄河源区的适用性评价[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 620-633. [Li Qiong, Yang Meixue, Wan Guoning, et al. Analysis of the accuracy of TRMM 3B43 precipitation data in the source region of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 620-633.]

[42] Sapiano M R P, Arkin P A. An intercomparison and validation of high-resolution satellite precipitation estimates with 3-hourly gauge data[J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 10(1): 149-166.

[43] Ren W, Yao T, Yang X, et al. Implications of variations in $\delta^{18}O$ and δD in precipitation at Madoi in the eastern Tibetan Plateau[J]. Quaternary International, 2013, 313: 56-61.

Comparison of downscaling methods for TRMM 3B43 precipitation data in the Qinghai Lake Basin and its surrounding areas

LI Yankun[1,2], GAO Liming[1,2,3], ZHANG Lele[1,2,3], WU Xueqing[1,2], LIU Xuanchen[1,2], QI Wen[1,2]

(1. College of Geography Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: Using multiple linear regression (MLR), principal component stepwise regression (PCSR), and Kriging, the TRMM 3B43 precipitation data in the Qinghai Lake Basin and surrounding areas with a resolution of 0.25° were downscaled to a resolution of 0.01°. The measured precipitation data of 20 meteorological stations in the study area were selected, and the correlation coefficient, root mean square error, and relative deviation (Bias) were used to evaluate the downscaling results. Downscaling methods for the study area. The results show a consistent spatial distribution of precipitation in the study area based on TRMM and the three downscaling methods. The annual average precipitation and the three seasons of spring, summer, and autumn are all high in the north, low in the west and northwest, and winter precipitation. The performance was high in the south and northwest and low in the middle. With increased altitude, the precipitation in the study area showed an overall trend of first increasing and then decreasing with 3800 meters as the boundary. The results of the accuracy evaluation show that the Kriging accuracy on the annual scale has the best performance. On the spatial scale, the TRMM and the three downscale data have the best accuracy in the eastern region. On the quarterly scale, the data precision is PCSR > Kriging > TRMM > MLR. On the monthly scale, the PCSR data accuracy is the best. The effect of altitude on the TRMM and the three downscaling data in the study area is small. However, with increasing altitude, the remote sensing data gradually underestimates the precipitation phenomenon, which may be due to the underestimation of precipitation and convection during microwave precipitation rate inversion underestimation of precipitation. From the comprehensive precipitation spatial distribution consistency analysis and precision evaluation, it is considered that PCSR is the most suitable downscaling method for TRMM 3B43 precipitation data in the Qinghai Lake Basin and surrounding areas.

Keywords: TRMM 3B43; downscaling; multiple linear regression; principal component stepwise regression; kriging; Qinghai Lake Basin